

Docket No.: 1333-013

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE
PATENT OPERATIONS

In re Application of:

Giuseppe Coppola et al

Serial No.: 10/566,036

Filed: January 25, 2006

)
)
) Group Art Unit:
)
)
) Examiner: --
)
) Customer No. 47888

For: METHOD FOR MODIFYING SPATIAL RESOLUTION IN THE
RECONSTRUCTION OF IMAGES IN DIGITAL HOLOGRAPHY

New York, NY 10036
February 21, 2006

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

CLAIM FOR CONVENTION PRIORITY UNDER 35 U.S.C. §119

SIR:


In the matter of the above-identified application and under the provisions of 35

U.S.C. §119 Inventor(s) claim the benefit of the following prior applications:

Application(s) filed in	:	Italy
In the name of Applicant(s)	:	Giuseppe Coppola
Application No(s).	:	RM 2003 A 000398
Filed	:	August 13, 2003

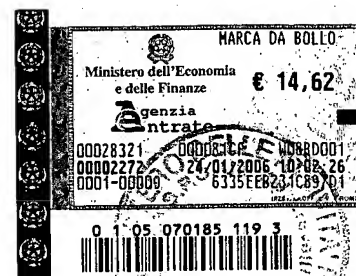
Pursuant to the Claim to Priority, Applicant is submitting a duly certified copy of
said foreign application.

Respectfully submitted,


James V. Costigan
Registration No. 25,669

HEDMAN & COSTIGAN, P.C.
1185 Avenue of the Americas
New York, NY 10036-2646
(212) 302-8989

BEST AVAILABLE COPY



Ministero delle Attività Produttive

Direzione Generale per lo Sviluppo Produttivo e la Competitività

Ufficio Italiano Brevetti e Marchi

Ufficio G2

**Autenticazione di copia di documenti relativi alla domanda di brevetto per:
INVENZIONE INDUSTRIALE N. RM 2003 A 000398**

Si dichiara che l'unità copia è conforme ai documenti originali
depositati con la domanda di brevetto sopra specificata, i cui dati
risultano dall'accluso processo verbale di deposito.

**CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT**

6 FEB. 2006

na, li.....

IL FUNZIONARIO

Paolo Giuliano

Dr. Paolo Giuliano

UFFICIO ITALIA/O BREVETTI E MARCHI - ROMA

DOMANDA DI BREVETTO PER INVENZIONE INDUSTRIALE, DEPOSITO RISERVE, ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO

A. RICHIEDENTE(I)

1) Denominazione Consiglio Nazionale delle Ricerche N.G. E N
 Residenza Roma, RM codice 0 2 1 1 8 3 1 1 0 0 6
 2) Denominazione _____
 Residenza _____ codice _____

B. RAPPRESENTANTE DEL RICHIEDENTE PRESSO L'U.I.B.M.

Cognome e nome IANNONE Carlo Luigi ed altri Cod. fiscale _____
 Denominazione studio di appartenenza Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.
 Via Piemonte n. 2 6 città ROMA Cap 0 0 1 8 7 (prov) R M

C. DOMICILIO ELETTIVO destinatario

Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.
 Via Piemonte n. 2 6 città ROMA Cap 0 0 1 8 7 (prov) R M

D. TITOLO

classe proposta (sez./cl./sc)

gruppo/sottogruppo

"Metodo per la modifica della risoluzione spaziale nella ricostruzione delle immagini in olografia digitale".

ANTICIPATA ACCESSIBILITÀ AL PUBBLICO: SI ☐ NO ☒ SE ISTANZA: DATA _____ N° PROTOCOLLO _____

E. INVENTORI DESIGNATI

cognome e nome

cognome e nome

1) COPPOLA Giuseppe3) FERRARO Pietro2) DE NICOLA Sergio4) FINIZIO Andrea

F. PRIORITÀ

nazione o
organizzazionetipo di
priorità

numero di domanda

1) _____
 2) _____

G. CENTRO ABILITATO DI RACCOLTA COLTURE DI M

H. ANNOTAZIONI SPECIALI

NESSUNA



SCIOGLIMENTO RISERVE

Data N. Protocollo

DOCUMENTAZIONE ALLEGATA

N. es. _____
 Doc. 1) 1 _____ n. pag. 3 5 riassunto con disegno principale, descrizione e rivendicazioni (obbligatorio 1 esemplare)
 Doc. 2) 1 PROV n. tav. 0 5 disegno
 Doc. 3) 0 RIS Lettera d'incarico
 Doc. 4) 1 _____ designazione inventore
 Doc. 5) _____ documenti di priorità con traduzione in italiano
 Doc. 6) _____ autorizzazione o atto di cessione
 Doc. 7) _____ nominativo completo del richiedente

SCIOGLIMENTO RISERVE

Data N° Protocollo

Confronta singole priorità

8) attestati di versamento, totale Euro DUECENTONOVANTUNO /80COMPILATO IL 1 3 / 0 8 / 2 0 0 3FIRMA DEL(I) Consiglio Nazionale delle RicercheCONTINUA SI/NO S IIng. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

MANDATARIO
 per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
 (N° d'iscr. 456)

DEL PRESENTE ATTO SI RICHIEDE COPIA AUTENTICA SI/NO S I

CAMERA di COMMERCIO. IND. ART. e AGR. -

VERBALE DI DEPOSITO NUMERO DI DOMANDA

RM 2003 A 000388codice 5 8L'anno DUEMILATRE, il giorno TREDICI

, del mese di

AGOSTO(i) richiedente(i) sopraindicato(i) ha(hanno) presentato a me sottoscritto la presente domanda, corredata di n 0 1 fogli aggiuntivi per la concessione del brevetto soprariportato.

ANNOTAZIONI VARIE DELL'UFFICIALE ROGANTE

IL DEPOSITANTE



L'UFFICIALE ROGANTE

FOGLIO AGGIUNTIVO n. 011

di totali 011

DOMANDA N. 1

REG. A

RM 2003 A 0000398

N.G.

A. RICHIEDENTE (I)

Denominazione		
Residenza		codice
Denominazione		
Residenza		codice
Denominazione		
Residenza		codice
Denominazione		
Residenza		codice
Denominazione		
Residenza		codice
Denominazione		
Residenza		codice

E. INVENTORI DESIGNATI

cognome e nome		cognome e nome	
05	PIERATTINI Giovanni		

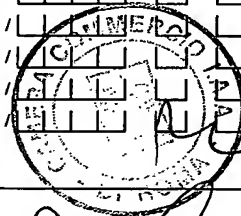
F. PRIORITÀ

nazione o organizzazione	tipo di priorità	numero di domanda	data di deposito	allegato S/R	SCIOGLIMENTO RISERVE Data N° Protocollo

FIRMA DEL(I) RICHIEDENTE(I)

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.



UN MANDATARIO

per se e per gli altri

Carlo Luigi Iannone

(N° d'iscr. 456)

SPAZIO RISERVATO ALL'UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

NUMERO DOMANDA

REG. A

DATA DI DEPOSITO 13/08/2003

NUMERO BREVETTO

DATA DI RILASCIO

RM 2003 A 000398

A. RICHIEDENTE(I)

1) Denominazione

Consiglio Nazionale delle Ricerche

2) Denominazione

D. TITOLO

"Metodo per la modifica della risoluzione spaziale nella ricostruzione delle immagini in olografia digitale".

Classe proposta (sez./cl./scl/)

(gruppo/sottogruppo)

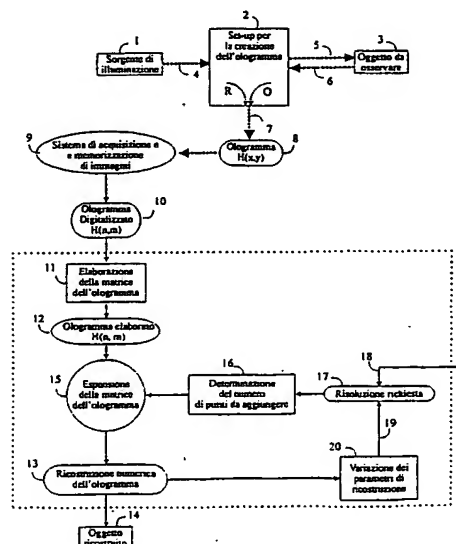
L. RIASSUNTO

L'invenzione riguarda un metodo un metodo per la ricostruzione di immagini olografiche, l'immagine olografica essendo rilevata da un dispositivo di rilevazione di immagini, l'immagine olografica essendo trasformata in un ologramma digitalizzato, l'ologramma digitalizzato essendo composto da un numero V_r di valori di intensità di segnale corrispondenti ad altrettante sottoimmagini elementari o "pixel" dell'immagine olografica, le dimensioni dei pixel essendo pari agli intervalli di campionamento dell'immagine olografica, il metodo comprendendo una prima fase di elaborazione della matrice dell'ologramma digitalizzato, ed una seconda fase di ricostruzione nel piano complesso dell'ologramma a partire dall'ologramma digitalizzato elaborato nella prima fase, il metodo essendo caratterizzato dal fatto che la seconda fase viene effettuata tramite trasformata di Fresnel discreta a partire da una matrice di V_e valori, comprendenti detti V_r valori, nonché un numero intero $p = V_e - V_r > 0$ di valori costanti pari a OS , corrispondenti ad altrettanti pixel di dimensioni uguali a quelle degli altri.

L'invenzione riguarda inoltre gli strumenti necessari alla esecuzione del metodo e l'apparato che lo esegue.

M. DISEGNO

FIGURA 2



DESCRIZIONE

a corredo di una domanda di Brevetto d'Invenzione
avente per titolo:

"Metodo per la modifica della risoluzione spaziale
nella ricostruzione delle immagini in olografia
digitale"

a nome: Consiglio Nazionale delle Ricerche

Inventori: Giuseppe COPPOLA, Sergio DE NICOLA,

Pietro FERRARO, Andrea FINIZIO,

Giovanni PIERATTINI

La presente invenzione riguarda un metodo per
la modifica della risoluzione spaziale nella
ricostruzione delle immagini in olografia digitale.

Più in particolare, il metodo secondo la
presente invenzione consente il miglioramento del
processo di ricostruzione delle immagini impiegato
nella tecnica interferometrica dell'olografia
digitale, grazie al miglioramento della risoluzione
spaziale del campo complesso ricostruito, ciò che
permette di potenziare le applicazioni della tecnica
di Olografia Digitale.

La tecnica interferometrica che consente di
registrare e di ricostruire il campo complesso
(ampiezza e fase) riflesso, trasmesso e/o diffuso da

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

un oggetto è comunemente denominata nella letteratura scientifica come il nome di Olografia Digitale (in inglese "Digital Holography"), e che nel seguito verrà abbreviato con l'acronimo DH (si vedano ad esempio: il Brevetto USA No. 6,262,818, di Cuche et al., avente per titolo "Method for simultaneous amplitude and quantitative phase contrast imaging by numerical reconstruction of digital holograms", ed il Brevetto USA No. 6,246,495, di Yamaguchi, avente per titolo "Phase-shift digital holographic apparatus").

E' chiamato ologramma digitale una figura di interferenza registrata per mezzo di una matrice integrata di rivelatori di radiazione.

Esistono diversi metodi che consentono la ricostruzione numerica del campo complesso a partire dall'ologramma ed in particolare il metodo della "convoluzione" e quello denominato di "Fresnel".

In particolare, nel metodo di Fresnel, come è noto, la risoluzione spaziale del campo complesso (o anche ampiezza e fase) è determinata da alcuni parametri. Alcuni di questi parametri sono determinati dalle caratteristiche della matrice integrata di rivelatori di radiazione ed in particolare dal numero di elementi di cui è composta la matrice e dalla dimensione del singolo elemento.

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

Altri parametri, invece, sono la distanza di ricostruzione, determinata dalla distanza d alla quale si trova l'oggetto (o punti della sua superficie e del suo volume) e la lunghezza d'onda λ della sorgente di illuminazione, utilizzata per creare l'ologramma, impiegate nel processo numerico di ricostruzione.

Comunemente, in letteratura, la risoluzione spaziale viene quantificata per mezzo del "pixel di ricostruzione" che è espresso come una lunghezza, e che sarà indicato nel seguito con l'acronimo PR. Le dimensioni del PR bidimensionale, $\Delta\xi$ lungo l'asse x e $\Delta\eta$ lungo l'asse y , dipendono dai parametri sopra citati attraverso le seguenti relazioni matematiche:

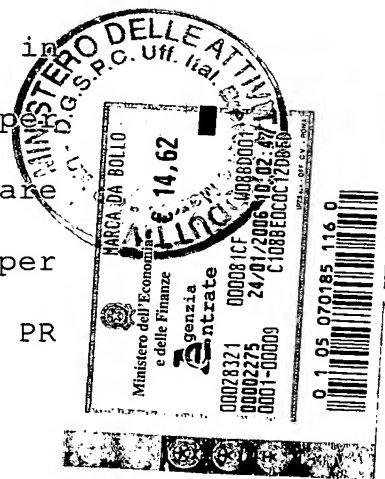
$$\Delta\xi = \frac{\lambda d}{N \Delta x} \quad \Delta\eta = \frac{\lambda d}{M \Delta y} \quad (1)$$

dove M è il numero di pixel acquisiti (da un dispositivo di acquisizione di immagine) lungo l'asse x , N il numero di pixel lungo l'asse y , Δx e Δy sono le dimensioni dei pixel nelle due direzioni degli assi x e y .

Da tale relazione è chiaro che il campo complesso a diverse distanze, a parità degli altri parametri, avrà un PR di diverso valore, ed in particolare all'aumentare della distanza di

ricostruzione la dimensione del PR aumenta. In tal caso, la risoluzione spaziale, con la quale è ricostruito il campo complesso, avrà una risoluzione spaziale inferiore. Al contrario, la risoluzione spaziale sarà superiore a distanza di ricostruzione inferiore giacché in tal caso la dimensione del PR diminuisce.

In altre applicazioni, quali ad esempio le indagini spettroscopiche o di dispersione, si richiede la registrazione di vari ologrammi dello stesso oggetto e nelle stesse condizioni, ma ottenuti con diverse lunghezze d'onda della sorgente (o con diverse sorgenti a differenti lunghezze d'onda) (si veda ad esempio l'articolo di M.K.Kim, "Wavelength-scanning digital interference holography for optical section imaging", Optics Letters, Vol. 24, Issue 23, 1999, pag. 1693). In tal caso, applicando il processo di ricostruzione ai vari ologrammi relativi ad ogni lunghezza d'onda, si otterranno degli ologrammi ricostruiti con risoluzioni spaziali differenti, in quanto, come è chiaro dall'equazione (1), il PR per ciascuna lunghezza d'onda è diverso. In particolare la risoluzione delle ricostruzioni sarà maggiore per lunghezze d'onda minori che forniscono valori di PR minori e viceversa.



Ing. Barzani & Zanardo Roma S.p.A.

Nello stato dell'arte anteriore alla presente invenzione, esistono alcuni problemi connessi al fatto che la risoluzione delle ricostruzioni sia rigidamente determinata da alcuni parametri quali distanza e lunghezza d'onda. A titolo di esempio, si accenna nel seguito ad alcuni casi particolarmente problematici.

In alcune applicazioni, l'olografia digitale è utilizzata per analizzare le variazioni che l'oggetto sotto osservazione subisce per effetto di un'azione esterna (ad esempio forza, pressione, variazione di temperatura). Le variazioni sono misurate in modo quantitativo sottraendo le mappe di fase di due ologrammi registrati con l'oggetto in due differenti stati (ad esempio prima e dopo l'azione della perturbazione esterna). Questa tecnica è denominata Interferometria Olografica Digitale.

In queste osservazioni di tipo dinamico, in modo non voluto potrebbe variare la distanza tra l'oggetto sotto osservazione ed il dispositivo di rilevazione (ad esempio una telecamera) in cui l'ologramma è registrato ottenendo diversi ologrammi registrati con l'oggetto posto a diverse distanze dal dispositivo di rilevazione. Per osservare l'oggetto sempre a fuoco, quindi, è necessario variare il

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

valore della distanza da impiegare nel processo di ricostruzione (si veda l'articolo di Ferraro et al. in *Optics Letters*, 28(14), (2003), 1257-1259), per ciascun ologramma registrato.

Dalle equazioni (1) risulta che per ologrammi ricostruiti a distanze diverse il valore del PR è diverso e di conseguenza è diversa la risoluzione spaziale con la quale l'oggetto (nel campo complesso: ampiezza e fase) viene ricostruito nei diversi ologrammi. Ciò impedisce di effettuare in modo diretto una differenza della fase ottenuta ad esempio con due ologrammi ricostruiti separatamente a due distanze diverse impedendo di fatto di applicare la tecnica di interferometria olografica digitale. Dato, infatti, che la risoluzione di ricostruzione è differente nei due ologrammi, allora non è possibile effettuare una sottrazione diretta delle mappe di fase (non esiste una corrispondenza biunivoca tra i punti delle due mappe).

In generale, la variazione ϕ della lunghezza d'onda o della distanza tra oggetto e telecamera, possono degradare la risoluzione con cui è possibile osservare l'oggetto.

Ciò impedisce in generale una qualsiasi sottrazione diretta della fase tra le due immagini

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

ricostruite al fine di rivelare e quantificare piccole variazioni fisico-meccaniche dell'oggetto. Tale procedura di sottrazione è tipicamente impiegata nella tecnica della "interferometria olografica" che permette di confrontare stati diversi dello stesso oggetto.

Analogamente, nel caso di applicazioni di DH a colori con l'impiego di diverse lunghezze d'onda, le immagini ricostruite con diverse lunghezze d'onda non si sovrappongono in quanto il PR di ciascuna ricostruzione è diverso (si vedano ad esempio l'articolo di I.Yamaguchi, "Phaseshifting color digital holography", Optics Letters, Vol. 27, Issue 13, Luglio 2002, pag. 1108, e l'articolo di J.Kato et al., "Multicolor digital holography with an achromatic phase shifter", Optics Letters, Vol. 27, Issue 16, 2002, pag. 1403.

Non sono note alla Richiedente soluzioni efficaci ai suddetti problemi.

Come infatti risulta dalla letteratura, i metodi attualmente impiegati per ottenere una migliore risoluzione nell'osservazione degli oggetti, fanno uso di complessi apparati sperimentali che richiedono procedure di calibrazione particolarmente delicate (si veda ad esempio: Indebetouw et al.,

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

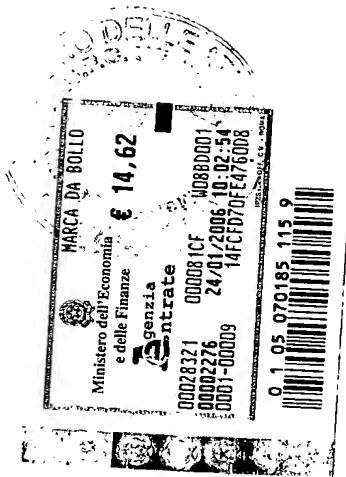
Appl. Phys. Lett. 75, (1999) 2017-2019).

E' scopo della presente invenzione quello di fornire un metodo di ricostruzione dell'immagine olografica a partire da un ologramma digitalizzato che risolva gli inconvenienti sopra descritti e consenta ulteriori utilizzazioni.

E' pure scopo specifico della presente invenzione quello di fornire gli apparati e gli strumenti necessari per l'esecuzione del metodo scopo dell'invenzione.

E' ulteriore scopo specifico della presente invenzione un apparato per acquisizione e ricostruzione di immagini olografiche che faccia uso del metodo scopo dell'invenzione.

E' oggetto specifico della presente invenzione un metodo per la ricostruzione di immagini olografiche, l'immagine olografica essendo rilevata da un dispositivo di rilevazione di immagini, l'immagine olografica essendo trasformata in un ologramma digitalizzato, l'ologramma digitalizzato essendo composto da un numero V_r di valori di intensità di segnale corrispondenti ad altrettante sottoimmagini elementari o "pixel" dell'immagine olografica, le dimensioni dei pixel essendo pari agli intervalli di campionamento dell'immagine olografica,



Ing. Barzani & Lanardo Roma S.p.A.

il metodo comprendendo una prima fase di elaborazione della matrice dell'ologramma digitalizzato, ed una seconda fase di ricostruzione nel piano complesso dell'ologramma a partire dall'ologramma digitalizzato elaborato nella prima fase, il metodo essendo caratterizzato dal fatto che la seconda fase viene effettuata tramite trasformata di Fresnel discreta a partire da una matrice di V_e valori, comprendenti detti V_r valori, nonché un numero intero $p = V_e - V_r > 0$ di valori costanti pari a OS , corrispondenti ad altrettanti pixel di dimensioni uguali a quelle degli altri.

Preferibilmente secondo l'invenzione, detti p valori costanti sono valori nulli ($OS = 0$).

Ancora preferibilmente secondo l'invenzione, detti p valori sono arrangiati all'esterno di detta matrice di V_r valori.

Sempre secondo l'invenzione, detti p valori possono essere arrangiati in modo simmetrico od in modo non simmetrico.

Preferibilmente secondo l'invenzione, detto numero V_e di valori è inversamente proporzionale alla dimensione del pixel che si vuole ottenere per l'immagine ricostruita.

Preferibilmente secondo l'invenzione,

l'ologramma digitalizzato è una matrice quadrata di $V_r = N_r \cdot M_r$ valori, ciascun valore corrispondendo ad un pixel quadrato di dimensioni $\Delta x, \Delta y$.

Ancora preferibilmente secondo l'invenzione, l'ologramma ricostruito nella seconda fase è rappresentato da una matrice quadrata di $V_e = N_e \cdot M_e$ valori, ciascun valore corrispondendo ad un pixel quadrato di dimensioni $\Delta \xi = (\lambda d / N_e \Delta x)$ e $\Delta \eta = (\lambda d / M_e \Delta y)$, λ essendo la lunghezza d'onda del fascio di onde che investe l'oggetto di cui si registra l'ologramma, e d la distanza tra il dispositivo di rilevazione e l'oggetto di cui si rileva l'ologramma, $\Delta \xi$ e $\Delta \eta$ essendo gli intervalli di campionamento dell'immagine olografica ricostruita.

Secondo l'invenzione, possono valere le relazioni $N_e = (\lambda d / \Delta x^2)$, $M_e = (\lambda d / \Delta y^2)$, $\Delta \xi = \Delta x$, $\Delta \eta = \Delta y$.

Vantaggiosamente secondo l'invenzione, se ciascun intervallo di campionamento dell'immagine olografica non è uguale o inferiore ad una soglia determinata, si incrementa il numero di valori p aggiunti alla matrice dell'ologramma digitalizzato e si svolge nuovamente la seconda fase.

Preferibilmente secondo l'invenzione, detta soglia è funzione del rapporto segnale/rumore

dell'immagine olografica.

E' ulteriore oggetto specifico della presente invenzione un programma per elaboratore caratterizzato dal fatto di comprendere mezzi a codice atti ad eseguire, quando operano su un elaboratore, il metodo oggetto dell'invenzione.

E' ancora oggetto specifico dell'invenzione un supporto di memoria leggibile da un elaboratore, avente un programma memorizzato su di esso, caratterizzato dal fatto che il programma è il programma per elaboratore oggetto dell'invenzione.

E' ulteriore oggetto specifico dell'invenzione un apparato per rilevazione di immagini olografiche, comprendente una unità di elaborazione dell'ologramma digitalizzato, caratterizzato dal fatto che l'unità di elaborazione elabora i dati rilevati utilizzando il metodo oggetto dell'invenzione.

L'invenzione verrà ora descritta a titolo illustrativo ma non limitativo, facendo particolare riferimento ai disegni delle figure allegate, in cui:

- la figura 1 mostra un diagramma ibrido a blocchi e di flusso del metodo di ricostruzione olografica tradizionale;

- la figura 2 mostra un diagramma ibrido a blocchi e di flusso che descrive il metodo di

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

ricostruzione olografica secondo l'invenzione;

- la figura 3a mostra l'effetto della ricostruzione in ampiezza di un reticolo di Ronchi con effetto Talbot realizzata tramite il metodo tradizionale;

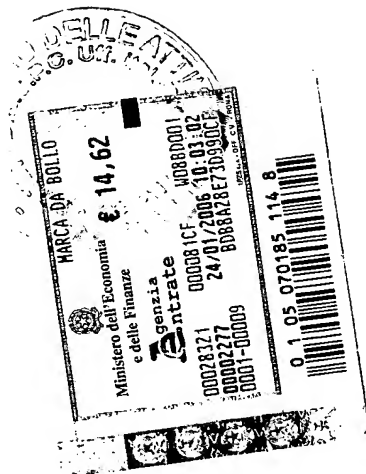
- la figura 3b mostra l'effetto della ricostruzione in ampiezza di un reticolo di Ronchi con effetto Talbot realizzata tramite il metodo secondo l'invenzione;

- la figura 4a mostra una informazione particolare relativa alla ricostruzione di figura 3a, relativamente ad una determina distanza di ricostruzione, in funzione del numero di pixel;

- la figura 4b mostra una informazione particolare relativa alla ricostruzione di figura 3b, relativamente ad una determina distanza di ricostruzione, in funzione del numero di pixel; e

- la figura 5 mostra una preferita disposizione dei pixel a valore nullo utilizzati nel metodo secondo l'invenzione.

Come sopra accennato, l'olografia digitale consiste nella registrazione di una distribuzione di interferenza, che si crea tra un fascio oggetto (che ha interagito con l'oggetto sotto osservazione) e un fascio di riferimento, mediante un sistema ad hoc per



Ing. Barzani & Zanardo Roma S.p.A.

acquisizione di immagini.

Tale distribuzione di interferenza è elaborata mediante metodi di elaborazione atti a ricostruire un'immagine dell'oggetto sotto osservazione.

In particolare, l'ologramma registrato viene moltiplicato per una replica digitale del fascio di riferimento e di tale prodotto si valuta l'integrale di diffrazione. Tale ologramma permette di ottenere una ricostruzione dell'oggetto sotto osservazione.

L'apparato di registrazione olografico in riflessione può essere ad esempio del tipo Mach-Zhender. Una volta acquisiti i dati analogici, essi vengono trattati da una unità di elaborazione.

Facendo riferimento alla figura 1, tale unità di elaborazione elabora i dati secondo il metodo tradizionale. L'unità di preparazione delle condizioni di acquisizione dell'ologramma o "set-up" 2 raccoglie la radiazione 4 proveniente dalla sorgente 1 e illumina con la radiazione 5 l'oggetto sotto osservazione 3. In tale set-up 2, inoltre, è presente un dispositivo per creare, dal fascio 6 riflesso, trasmesso o diffuso dall'oggetto 3, un fascio oggetto O , ed un dispositivo per la creazione di un fascio di riferimento R . Il fascio oggetto O ed il fascio di riferimento R sono combinati nel set-up

Ing. Barzani S. Zanardo Roma I.p.A.

2 in modo da creare una distribuzione d'interferenza 7 in un piano. Tale interferenza crea l'ologramma 8 dell'oggetto sott'osservazione 3, e può essere descritto in termini di distribuzione bidimensionale di intensità:

$$H(x,y) = |R|^2 + |O|^2 + R^*O + RO^*$$

dove R^* e O^* rappresentano, rispettivamente, i complessi coniugati del fascio di riferimento e del fascio oggetto.

Occorre qui subito specificare che, come sarà più avanti illustrato, il metodo secondo la presente invenzione non è ristretto al campo ottico e può essere applicato per la ricostruzione numerica di ologrammi registrati con qualsiasi tipo di radiazione elettromagnetica (ad esempio raggi X) e non elettromagnetica (ad esempio fasci di elettroni e/o onde acustiche). In particolare, la sorgente 1 potrebbe essere costituita anche da una combinazione di due o più lunghezze d'onda. Per tale motivo, la natura, la lunghezza d'onda e la coerenza della sorgente 1 potrebbero essere qualsiasi.

L'ologramma 8 è acquisito, digitalizzato e memorizzato tramite un sistema di acquisizione 9. Ogni tipo di sistema di acquisizione immagini

esistente o sviluppabile in futuro può essere utilizzato allo scopo.

Il sistema di acquisizione 9 ha al suo interno un dispositivo per la digitalizzazione e per la memorizzazione su computer dell'immagine acquisita 8. L'immagine digitalizzata è denominata "ologramma digitale" 10 ed è descritto da una matrice $H(n \cdot \Delta x, m \cdot \Delta y)$ di $N \cdot M$ numeri, ottenuti dal campionamento spaziale bidimensionale dell'ologramma 8 $H(x, y)$.

Tale campionamento spaziale bidimensionale può essere descritto dalla seguente relazione:

$$H(n\Delta x, m\Delta y) = H(x, y) \text{rect}\left(\frac{x}{N\Delta x}, \frac{y}{M\Delta y}\right) \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \delta(x - n\Delta x, y - m\Delta y)$$

dove $\delta(x, y)$ è una funzione delta di Dirac bidimensionale, n e m sono interi, Δx e Δy sono gli intervalli di campionamento lungo l'asse x e l'asse y rispettivamente, $(N \cdot \Delta x) \times (M \cdot \Delta y)$ è l'area dell'immagine dell'ologramma acquisito, $\text{rect}(x, y)$ è una funzione il cui valore è 1 se il punto di coordinate (x, y) è interno alla parte dell'ologramma acquisito e 0 altrove.

Per una perfetta ricostruzione dell'immagine dell'oggetto è necessario che il processo di digitalizzazione soddisfi il teorema del

campionamento. In particolare deve essere soddisfatta la condizione che la spaziatura tra le frange presenti nella distribuzione di interferenza 7 sia superiore ad almeno due pixel del sistema di acquisizione 9. Il teorema del campionamento, quindi, impone la risoluzione minima che è possibile ottenere con un dato set-up sperimentale 2.

Uno dei grandi vantaggi offerti dall'olografia digitale risiede nel fatto di poter agire direttamente sull'ologramma digitalizzato 10 dell'oggetto 3 per effettuare delle operazioni sulle informazioni acquisite.

Ciò significa che sull'ologramma digitalizzato 10 possono essere realizzate differenti elaborazioni per il processamento delle immagini 11. Mediante tali elaborazioni è possibile eliminare, ad esempio, l'ordine zero di diffrazione presente nella ricostruzione dell'ologramma, oppure eliminare di una qualsiasi "aberrazione di fase" introdotta dal sistema ottico utilizzato.

Con il termine "aberrazione di fase" si intende una deformazione del fronte d'onda che viaggia attraverso il sistema di creazione e registrazione dell'ologramma. La correzione dell'aberrazione di fase compensa tali deformazioni e permette di

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.



ottenere una corretta ricostruzione dell'oggetto osservato.

Il processo di ricostruzione numerica 13 dell'oggetto sotto osservazione, si basa su due passi. Nel primo, l'ologramma digitalizzato "elaborato" $H(n,m)$ 12 deve essere moltiplicato per una replica digitalizzata del fascio di riferimento R , ottenendo la seguente relazione:

$$\begin{aligned} F(n\Delta x, m\Delta y) &= \mathcal{H}(n\Delta x, m\Delta y) \cdot R(n\Delta x, m\Delta y) = \\ &= R|R|^2 + R|O|^2 + RR^*O + RRO^* \end{aligned}$$

dove i primi due termini corrispondono all'ordine zero di diffrazione, dal terzo e/o dal quarto termine è possibile ricavare l'immagine dell'oggetto osservato.

Il secondo passo del processo di propagazione consiste nella propagazione della distribuzione di campo $F(n,m)$ dal piano in cui è situata la telecamera al piano d'osservazione. Questo processo porta all'immagine ricostruita 14.

Si può quindi agire numericamente sull'ologramma registrato e memorizzato in forma digitale tramite un dispositivo elettronico per acquisizione di immagine (da qui in poi denominato genericamente telecamera) costituito da un insieme discreto di elementi sensibili organizzati in forma

di matrice di N righe e M colonne, per poter ottenere una risoluzione spaziale maggiore rispetto alle attuali tecniche in uso.

Per ovviare agli inconvenienti sopra descritti del metodo tradizionale, il metodo secondo la presente invenzione si basa sull'estensione della matrice dell'ologramma dell'oggetto attraverso introduzione di un numero di punti fittizi aggiuntivi, la cui intensità è posta a zero.

L'oggetto è poi ricostruito con la tecnica della propagazione numerica dell'ologramma dal piano della telecamera per la distanza che separa l'oggetto dal piano della telecamera stesso.

La propagazione dell'ologramma avviene utilizzando la trasformata bidimensionale di Fresnel. Il vantaggio di tale integrale è che la sua computazione è semplice e può essere eseguita molto velocemente utilizzando una formulazione discreta espressa in termini di trasformata di Fourier. E' ben noto, infatti, (si veda Goodman, "Introduction to Fourier Optics", MacGraw-Hill Companies Inc., 2nd ed., 1996), che il fenomeno della propagazione della luce da un piano iniziale ad un piano parallelo posto a distanza d può essere interpretato come un sistema lineare spazio-invariante caratterizzato da una

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

funzione di trasferimento avente una ampiezza di banda finita. Tale funzione di trasferimento ha modulo unitario e fase dipendente dalle frequenze spaziali corrispondenti alle due direzioni ortogonali nel piano posto a distanza z dal piano iniziale.

Nel caso della propagazione di un campo ottico mediante l'integrale numerico di Fresnel, la fase della funzione di trasferimento dipende quadraticamente dalle frequenze spaziali. Conseguentemente, vengono introdotti nel processo di ricostruzione numerica dell'ologramma effetti dispersivi che aumentano all'aumentare della distanza di ricostruzione e che, in generale, contribuiscono a degradare la risoluzione spaziale dell'ologramma ricostruito.

Come sarà chiarito nel seguito, l'estensione della dimensione della matrice dell'ologramma, tramite l'aggiunta di elementi nulli, permette di agire sulla dimensione dell'elemento minimo che compone l'immagine ricostruita dell'oggetto (il "pixel di ricostruzione"), aumentandone invece la risoluzione.

Facendo riferimento alla figura 2, come nel caso tradizionale, per attuare il metodo secondo l'invenzione occorre anzitutto disporre di un sistema

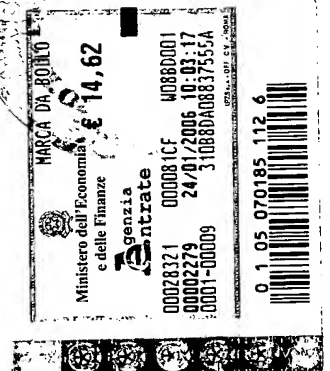
olografico per la creazione di un ologramma dell'oggetto sotto osservazione.

Tale ologramma è digitalizzato e memorizzato su un computer tramite una telecamera. L'ologramma digitalizzato è una matrice rettangolare ottenuta dal campionamento dell'ologramma effettuato dalla telecamera con un passo Δx lungo l'asse x e con passo Δy lungo l'asse y (Δx e Δy coincidono con la dimensione del pixel della telecamera) per un numero di punti pari a $N \cdot M$ (N è numero di pixel della telecamera lungo l'asse x e M è numero di pixel della telecamera lungo l'asse y).

La dimensione della matrice relativa all'ologramma digitalizzato è poi ingrandita aggiungendo un numero di punti opportuno e tali da poter ottenere la desiderata risoluzione nel processo di ricostruzione dell'ologramma.

Utilizzando tale matrice estesa diventa allora possibile sfruttare la tecnica della trasformata bidimensionale di Fresnel per ricostruire l'immagine dell'oggetto sotto osservazione, guadagnando in definizione.

Nella configurazione preferita dagli inventori, il set-up 2 è progettato in modo da produrre un "ologramma di Fresnel", termine con il quale si



Ing. Barzani & Zanardo Roma S.p.A.

designa un ologramma che può essere ricostruito mediante l'approssimazione di diffrazione scalare di Fresnel.

I vantaggi di tale approssimazione risiedono nel fatto che la sua computazione è molto semplice e può essere eseguita in maniera molto veloce. Nel caso di approssimazione di Fresnel, la ricostruzione numerica dell'ologramma 12 sarà effettuata secondo l'invenzione mediante una formulazione discreta dell'integrale di Fresnel espresso in termini di trasformata discreta di Fourier, ossia:

$$\psi(l\Delta x, k\Delta y) = Ae^{\frac{i\pi}{\lambda d}(l^2\Delta x^2 + k^2\Delta y^2)} \text{DFT} \left[R(n\Delta x, m\Delta y) e^{\frac{i\pi}{\lambda d}(n^2\Delta x^2 + m^2\Delta y^2)} \right]_{l,k}$$

dove λ è la lunghezza d'onda della sorgente 1, A è una costante complessa, n, m, l, k sono interi ($-N/2 \leq n, l \leq N/2$ e $-M/2 \leq m, k \leq M/2$), DFT è la trasformata discreta di Fourier, che può essere calcolata velocemente ricorrendo ai molteplici algoritmi FFT (Fast Fourier Transform) riportati in letteratura, Δx e Δy sono gli intervalli di campionamento dell'ologramma 12 (quindi nel piano della telecamera), d è la distanza tra il piano della telecamera e il piano di osservazione, ed, infine, $\Delta \xi$ e $\Delta \eta$ rappresentano gli intervalli spaziali di campionamento nel piano d'osservazione e sono

definiti da:

$$\Delta\xi = \frac{\lambda d}{N\Delta x} \quad \Delta\eta = \frac{\lambda d}{M\Delta y} \quad (1)$$

L'oggetto ricostruito, quindi, avrà dimensioni $(N\Delta\xi) \times (M\Delta\eta)$. Gli intervalli descritti dalle equazioni (1) definiscono sostanzialmente la risoluzione dell'oggetto ricostruito 14.

Come si può notare dalla precedente relazione la risoluzione dipende oltre che dal numero di pixel e dalla risoluzione del sistema di acquisizione 9, anche dalla lunghezza d'onda λ della sorgente 1 e dalla distanza di ricostruzione d .

Nei processi di ricostruzione risulta generalmente $\Delta\xi > \Delta x$ e $\Delta\eta > \Delta y$, ossia l'immagine dell'oggetto ricostruito è caratterizzata da una risoluzione inferiore rispetto a quella con cui l'ologramma 8 è stato digitalizzato e registrato.

Come illustrato nel seguito, il metodo secondo l'invenzione permette di risolvere il suddetto problema e a parità di lunghezza d'onda e distanza di ricostruzione d , di incrementare la risoluzione dell'immagine dell'oggetto ricostruito 14.

Sempre facendo riferimento alla figura 2, il metodo proposto permette, da un lato, di non apportare modifiche al sistema di creazione e registrazione dell'ologramma 8, e dall'altro, di

poter essere compatibile per applicazioni in cui la registrazione dell'ologramma deve essere effettuata in tempo reale ed in modo continuo.

Nella versione attualmente preferita dagli inventori il metodo agisce sull'ologramma elaborato 12; ossia sull'ologramma già sottoposto ad elaborazioni per una corretta ricostruzione dell'oggetto 3.

La dimensione della matrice che descrive l'ologramma digitalizzato 12 viene espansa nella fase 15 con l'aggiunta di un determinato numero di punti come determinato nella fase 16.

Il numero di punti da aggiungere 16 è determinato dalla risoluzione 17 che si desidera ottenere nel processo di ricostruzione 13.

Il valore di tale risoluzione 17 può essere fornito o da condizioni poste da esigenze esterne 18 al processo di ricostruzione 13 (ad esempio per osservare con maggior accuratezza l'immagine dell'oggetto) o per compensare la perdita di risoluzione 19 dovuta al processo di ricostruzione in applicazioni che richiedono, in particolare, la variazione 20 di λ e/o d .

Il numero di punti non è la sola caratteristica che permette di ottenere successivamente un aumento

della risoluzione.

Infatti, occorre disporre i punti fittizi introdotti (ovvero la differenza tra i punti calcolati come sopra ed i punti acquisiti) in modo opportuno rispetto ai punti rilevati.

Occorre assicurarsi che gli zeri introdotti non risultino in una immagine trasformata (secondo la sopra descritta funzione $\psi(l \cdot \Delta x, k \cdot \Delta y)$) che presenta frequenze false.

Ad esempio, porre degli zeri tra valori non nulli di un andamento sinusoidale introdurrebbe chiaramente delle frequenze lontane da quella della sinusoide.

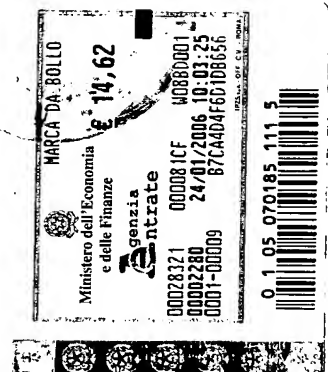
Sebbene singole disposizioni particolari possano essere convenientemente adottate in casi specifici, la disposizione preferita secondo l'invenzione è quella che vede i punti fittizi come contorno all'immagine rilevata, ossia senza intramezzarli ai punti effettivi.

Facendo riferimento all'esempio di figura 5, i punti fittizi 50 sono posti simmetricamente al contorno dei pixel 51 dell'immagine rilevata.

Questa disposizione al contorno è adatta ad immagini in un numero qualsiasi di dimensioni.

Alla matrice espansa dell'ologramma è poi

Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.



applicato il classico processo di ricostruzione 13.

L'espansione 15 delle dimensioni della matrice dell'ologramma 12, permette grazie alle proprietà della DFT, di ottenere un'immagine ricostruita con una spaziatura inferiore (ossia con una migliore risoluzione) rispetto alla ricostruzione ottenuta senza l'espansione della matrice.

In altre parole, il processo di ricostruzione tradizionale basato sulla trasformata di Fresnel comporta una degradazione della risoluzione con cui l'oggetto è ricostruito; l'aggiunta secondo l'invenzione di nuovi elementi nella matrice dell'ologramma permette invece di correggere tale perdita di risoluzione ottenendo al limite una risoluzione pari a quella fisica imposta dal teorema del campionamento.

In particolare, se si desidera ottenere un'immagine dell'oggetto ricostruita 14 con la stessa risoluzione dell'ologramma digitalizzato 10, a parità di lunghezza d'onda λ e di distanza di ricostruzione d , bisogna espandere la matrice dell'ologramma 12 dalle dimensione $N \cdot M$ alle dimensioni $(d\lambda/\Delta x^2) \cdot (d\lambda/\Delta y^2)$ come si ottiene invertendo le relazioni (1).

Teoricamente sarebbe possibile aumentare

Ing. Barzani & Zanardo Roma S.p.A.

indefinitamente la risoluzione dell'immagine olografica aggiungendo sempre nuovi punti fittizi. In realtà, poiché la trasformata di Fresnel ridistribuisce l'intensità su tutti i punti, oltre un certo numero di punti fittizi si avrebbe che l'intensità di molti scenderebbe al di sotto del rumore di fondo del segnale o del rumore statistico dello stesso. Tuttavia, è questione di semplice calcolo la determinazione del numero massimo di punti fittizi utilizzabili in ogni situazione specifica.

In figura 3 è riportato un esempio di applicazione del suddetto metodo. Tale esempio è relativo ad una sorgente di illuminazione 1 coerente e monocromatica con lunghezza d'onda di emissione $\lambda=532$ nm, l'oggetto osservato 3 è un reticolo di Ronchi con passo $\Lambda=6.25$ linee/mm, il sistema di acquisizione e memorizzazione è costituito da una CCD con $N=512$ e $M=512$ pixel e con dimensione del pixel quadrata e pari a $\Delta x=\Delta y=6.7\mu\text{m}$. Un reticolo di Ronchi illuminato con luce monocromatica genera il noto effetto Talbot, ossia osservando la luce diffusa dal reticolo a distanze sempre più grosse le rigature del reticolo appaiono sempre più sfocate, tranne che a particolari distanze (multiple della cosiddetta distanza di Talbot, ossia Λ^2/λ), dove le rigature

riappaiono ben definite e messe a fuoco. Utilizzando tale effetto, quindi, possiamo non occuparci dei problemi di messa a fuoco.

In particolare, in figura 3a è riportata la ricostruzione olografica per diversi valori della distanza d tra piano dell'ologramma e piano d'osservazione, di una singola linea del suddetto reticolo, il cui ologramma è stato registrato ad una distanza effettiva di 170mm.

I marcatori posti sulla figura mostrano le distanze a cui, per effetto Talbot, bisogna osservare le rigature del reticolo ben definite e messe a fuoco.

La tipica forma a "tromba" della figura 3a, ottenuta al variare della distanza d , è indice, in accordo con le equazioni (1), della riduzione del pixel di ricostruzione.

La riduzione del pixel di ricostruzione, e quindi della risoluzione nell'immagine ricostruita, all'aumentare della distanza d , impedisce di osservare nitidamente le rigature del reticolo; vi è, quindi, una perdita di informazione all'aumentare della distanza di ricostruzione.

Il metodo secondo l'invenzione permette di recuperare tale informazione.

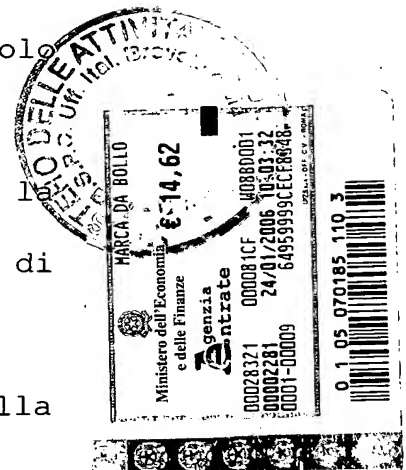
In figura 3b è riportata la ricostruzione olografica, per gli stessi valori della distanza d utilizzati in figura 3a, dell'ologramma espanso del reticolo di Ronchi.

In particolare, le dimensioni dell'ologramma sono state aumentate di 512 punti sia sull'asse x che sull'asse y , ottenendo quindi un ologramma di $1024 \cdot 1024$ pixel. La forma che si ottiene, ovviamente, è ancora a "tromba", ma è possibile osservare che all'aumentare della distanza di ricostruzione è ancora possibile individuare le distanze a cui le rigature del reticolo riappaiono ben definite e messe a fuoco. Per meglio evidenziare il vantaggio apportato dal presente metodo di ricostruzione, in figura 4a e figura 4b, è riportata una linea, ad una determinata distanza di ricostruzione ($d=434$ mm), relativa alla figura 3a e alla figura 3b, rispettivamente. La differenza tra tale distanza e la distanza di registrazione (170 mm) è multipla della distanza di Talbot, quindi, le rigature del reticolo dovrebbero apparire ben definite.

Osservando, però, la figura 4a si nota che la perdita di risoluzione non permette di osservare di distinguere nitidamente le rigature del reticolo.

L'applicazione del metodo oggetto della

Ing. Barzani & Zanardo Roma S.p.A.



presente invenzione permette di superare tale degradazione. Osservando, infatti, la figura 4b, in cui si è effettuata la ricostruzione dell'ologramma espanso del reticolo, si nota che le rigature del reticolo sono ben visibili e nette.

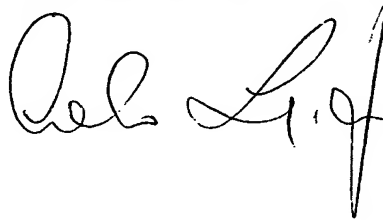
Il metodo di ricostruzione secondo l'invenzione rappresenta un significativo miglioramento rispetto ad altri metodi presenti in letteratura. Infatti, il metodo secondo l'invenzione agisce sull'ologramma digitalizzato dell'oggetto, e può adattare la risoluzione dell'immagine ricostruita dell'oggetto alle varie esigenze delle molteplici applicazioni.

L'invenzione si colloca in particolare, ma non esclusivamente, nei processi di ricostruzione in olografia digitale dove vi è l'esigenza di aumentare la risoluzione con la quale è ricostruito il campo complesso (ampiezza e fase) trasmesso o riflesso o diffuso dall'oggetto o di mantenere costante tale risoluzione quando la variazione di altri parametri, di cui è funzione la ricostruzione stessa, tenderebbero al peggioramento del potere risolutivo della tecnica olografica. In numerose applicazioni, soprattutto metrologiche, esiste la necessità di aumentare la risoluzione con cui un oggetto è osservato, modificando il meno possibile l'apparato

Ing. Barzani S. Zanardo Roma I.p.A.

di osservazione ed evitando di incrementare i tempi di acquisizione. Questa ultima esigenza è particolarmente sentita in tutte quelle applicazioni dove è richiesta un'osservazione in tempo reale dell'oggetto.

In quel che precede sono state descritte le preferite forme di realizzazione e sono state suggerite delle varianti della presente invenzione, ma è da intendersi che gli esperti del ramo potranno apportare modificazioni e cambiamenti senza con ciò uscire dal relativo ambito di protezione, come definito dalle rivendicazioni allegate.



UN MANDATARIO
per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
(N° d'iscr. 456)



Ing. Barzani & Zanardo Roma I.p.A.

RIVENDICAZIONI

1. Metodo per la ricostruzione di immagini olografiche, l'immagine olografica essendo rilevata da un dispositivo di rilevazione di immagini, l'immagine olografica essendo trasformata in un ologramma digitalizzato, l'ologramma digitalizzato essendo composto da un numero V_r di valori di intensità di segnale corrispondenti ad altrettante sottoimmagini elementari o "pixel" dell'immagine olografica, le dimensioni dei pixel essendo pari agli intervalli di campionamento dell'immagine olografica, il metodo comprendendo una prima fase di elaborazione della matrice dell'ologramma digitalizzato, ed una seconda fase di ricostruzione nel piano complesso dell'ologramma a partire dall'ologramma digitalizzato elaborato nella prima fase, il metodo essendo caratterizzato dal fatto che la seconda fase viene effettuata tramite trasformata di Fresnel discreta a partire da una matrice di V_e valori, comprendenti detti V_r valori, nonché un numero intero $p = V_e - V_r > 0$ di valori costanti pari a OS , corrispondenti ad altrettanti pixel di dimensioni uguali a quelle degli altri.

2. Metodo secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detti p valori costanti

Ing. Barzani & Zanardo Roma S.p.A.

sono valori nulli ($OS = 0$).

3. Metodo secondo la rivendicazione 1 o 2, caratterizzato dal fatto che detti p valori sono arrangiati all'esterno di detta matrice di V_r valori.

4. Metodo secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che detti p valori sono arrangiati in modo simmetrico.

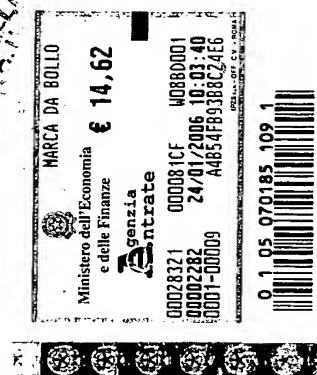
5. Metodo secondo la rivendicazione 3, caratterizzato dal fatto che detti p valori sono arrangiati in modo non simmetrico.

6. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 5, caratterizzato dal fatto che detto numero V_e di valori è inversamente proporzionale alla dimensione del pixel che si vuole ottenere per l'immagine ricostruita.

7. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che l'ologramma digitalizzato è una matrice quadrata di $V_r = N_r \cdot M_r$ valori, ciascun valore corrispondendo ad un pixel quadrato di dimensioni $\Delta x, \Delta y$.

8. Metodo secondo la rivendicazione 7 caratterizzato dal fatto che l'ologramma ricostruito nella seconda fase è rappresentato da una matrice quadrata di $V_e = N_e \cdot M_e$ valori, ciascun valore corrispondendo ad un pixel quadrato di dimensioni $\Delta x, \Delta y$.

Ing. Barzani & Zanardo Roma S.p.A.



= $(\lambda d/N_e \Delta x)$ e $\Delta \eta = (\lambda d/M_e \Delta y)$, λ essendo la lunghezza d'onda del fascio di onde che investe l'oggetto di cui si registra l'ologramma, e d la distanza tra il dispositivo di rilevazione e l'oggetto di cui si rileva l'ologramma, $\Delta \xi$ e $\Delta \eta$ essendo gli intervalli di campionamento dell'immagine olografica ricostruita.

9. Metodo secondo la rivendicazione 8, caratterizzato dal fatto che $N_e = (\lambda d/\Delta x^2)$, $M_e = (\lambda d/\Delta y^2)$, $\Delta \xi = \Delta x$, $\Delta \eta = \Delta y$.

10. Metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, caratterizzato dal fatto che, successivamente alla seconda fase, se ciascun intervallo di campionamento dell'immagine olografica non è uguale o inferiore ad una soglia determinata, si incrementa il numero di valori p aggiunti alla matrice dell'ologramma digitalizzato e si svolge nuovamente la seconda fase.

11. Metodo secondo la rivendicazione 10, caratterizzato dal fatto che detta soglia è funzione del rapporto segnale/rumore dell'immagine olografica.

12. Programma per elaboratore caratterizzato dal fatto di comprendere mezzi a codice atti ad eseguire, quando operano su un elaboratore, il metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 11.

13. Supporto di memoria leggibile da un

elaboratore, avente un programma memorizzato su di esso, caratterizzato dal fatto che il programma è il programma per elaboratore secondo la rivendicazione 12.

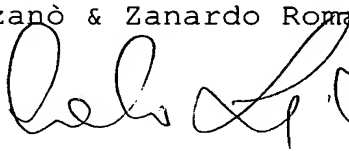
14. Apparato per rilevazione di immagini olografiche, comprendente una unità di elaborazione dell'ologramma digitalizzato, caratterizzato dal fatto che l'unità di elaborazione elabora i dati rilevati utilizzando il metodo secondo una qualsiasi delle rivendicazioni da 1 a 11.

Roma, 13 AGO. 2003

p.p.: Consiglio Nazionale delle Ricerche

Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

AS/AP



UN MANDATARIO
per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
(N° d'iscr 456)

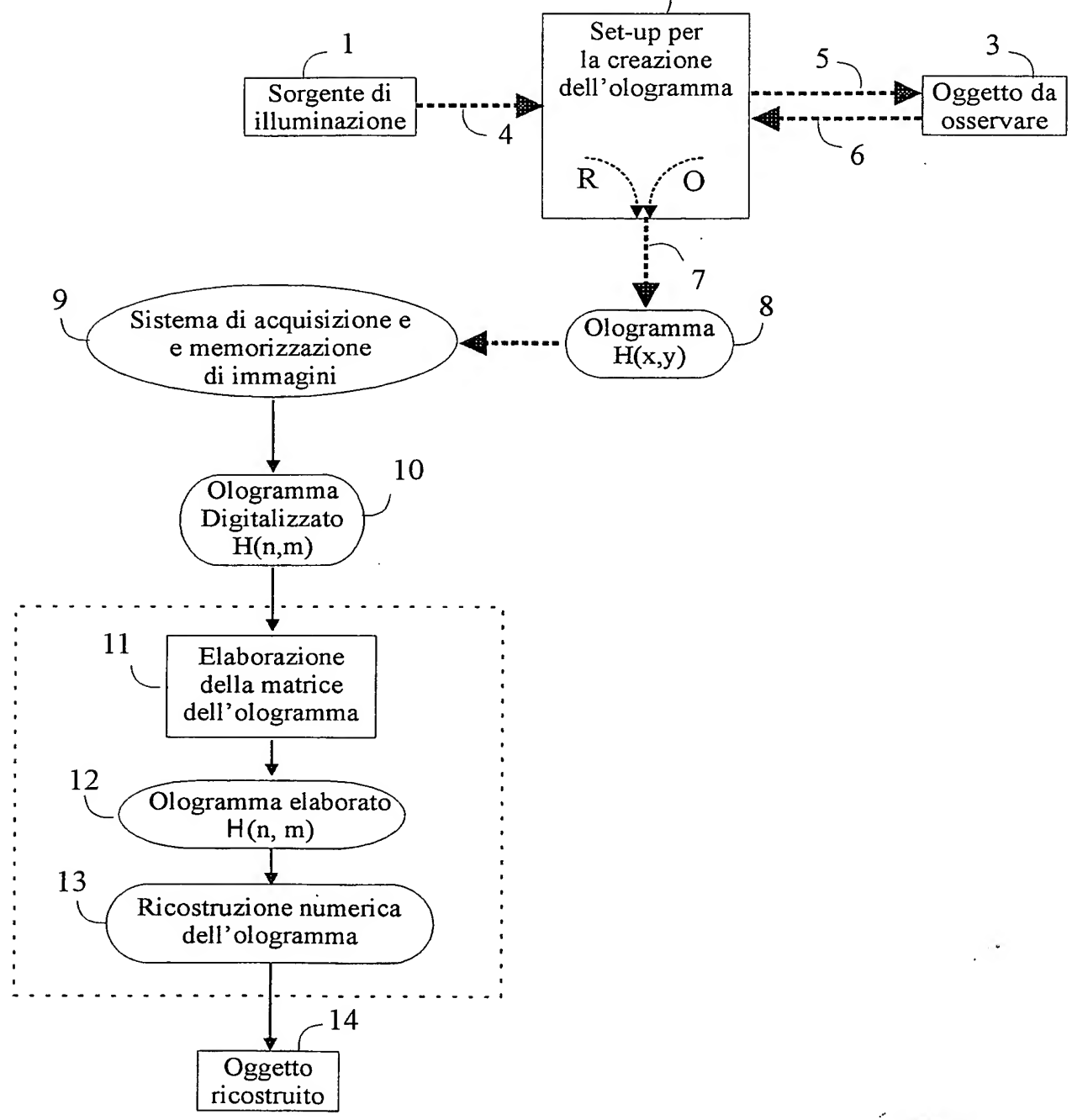


Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

1/5

FIGURA ~~1~~ 1

RM 2003 A 000398

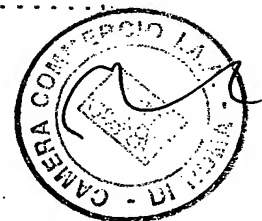
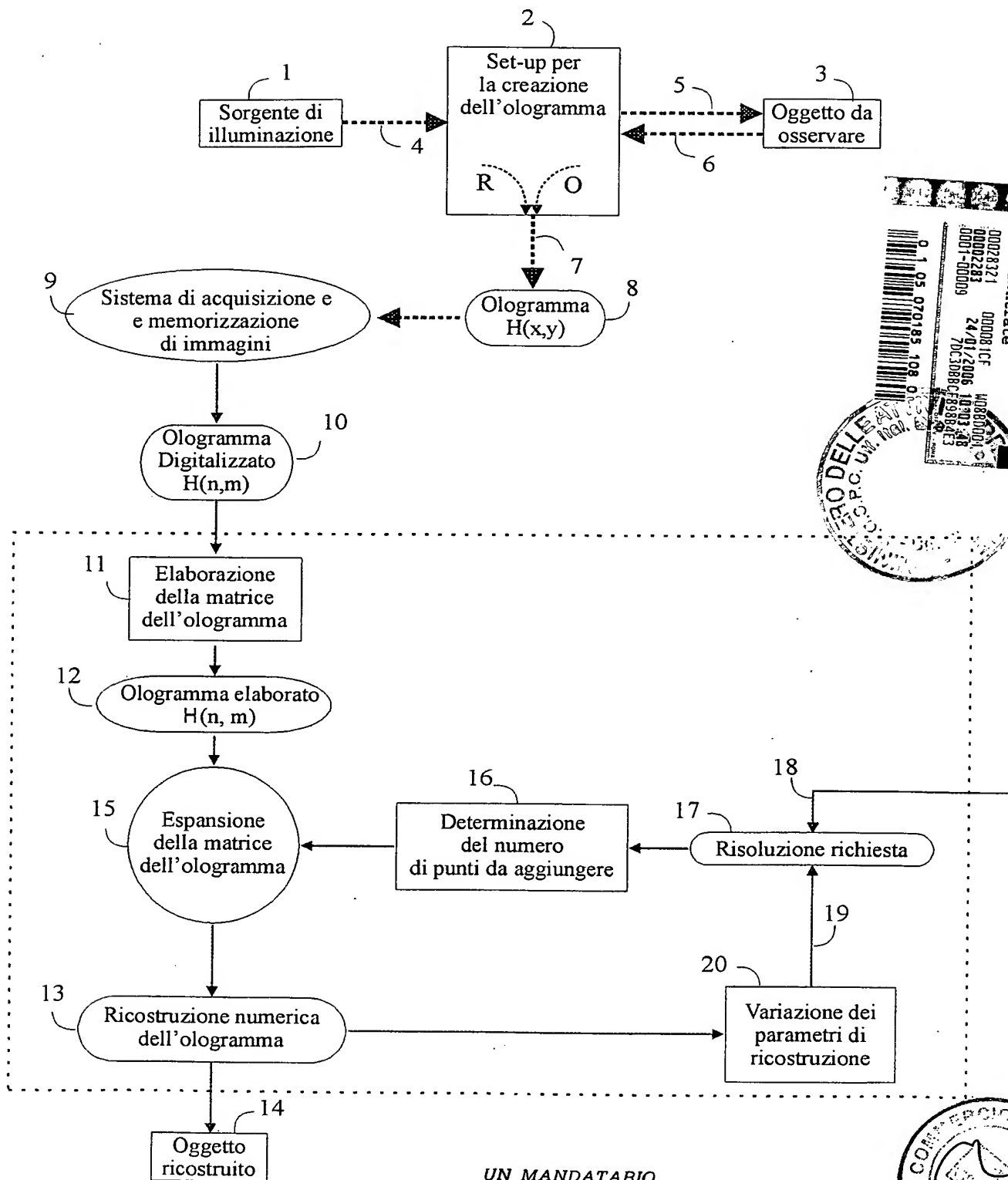


UN MANDATARIO
per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
(N° d'isen 456)

2/5

FIGURA 3

RM 2003 A 000398

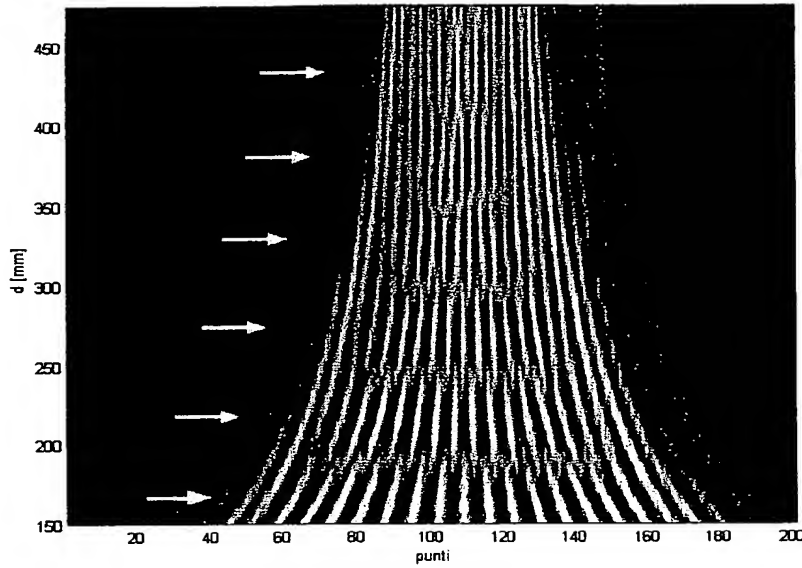


UN MANDATARIO
per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
(N° d'iscr. 456)

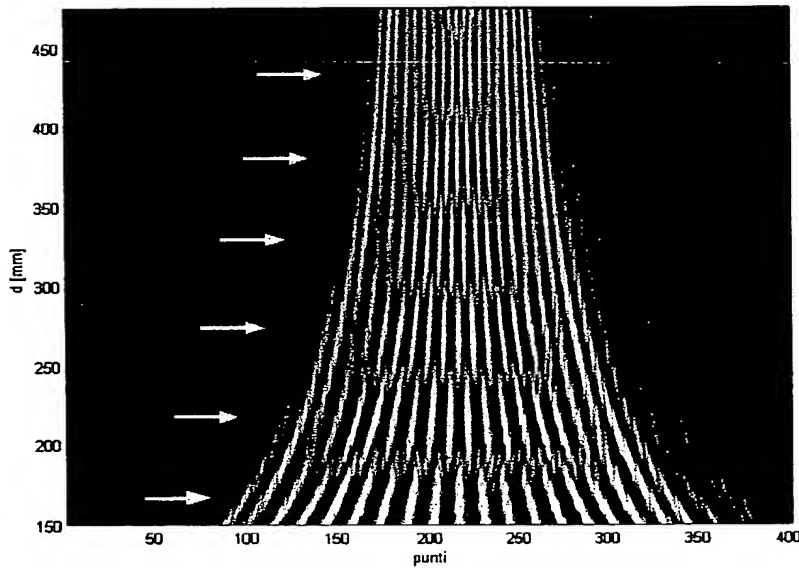
3/5

FIGURA 4

RM 2003 A 000 398



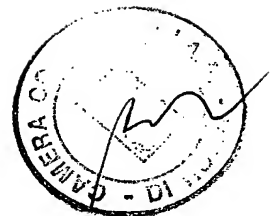
(a)



(b)

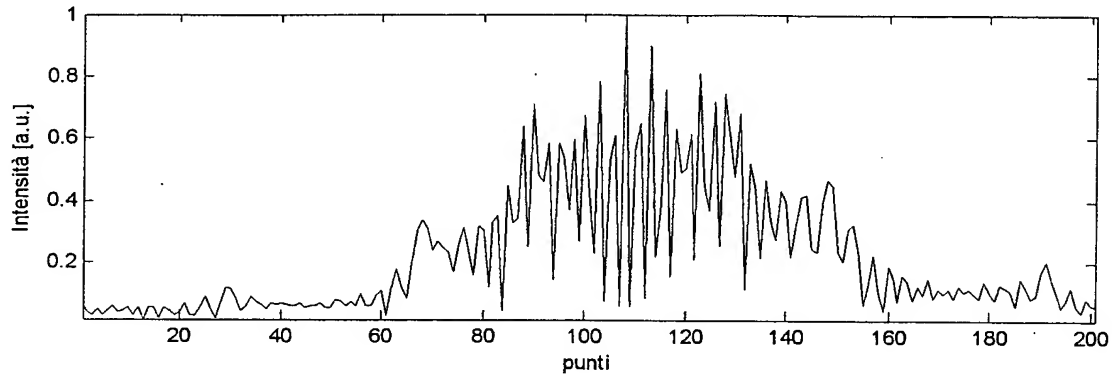
UN MANDATARIO
per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
(N° d'iscr. 456)

p.p.: Consiglio Nazionale delle Ricerche
Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

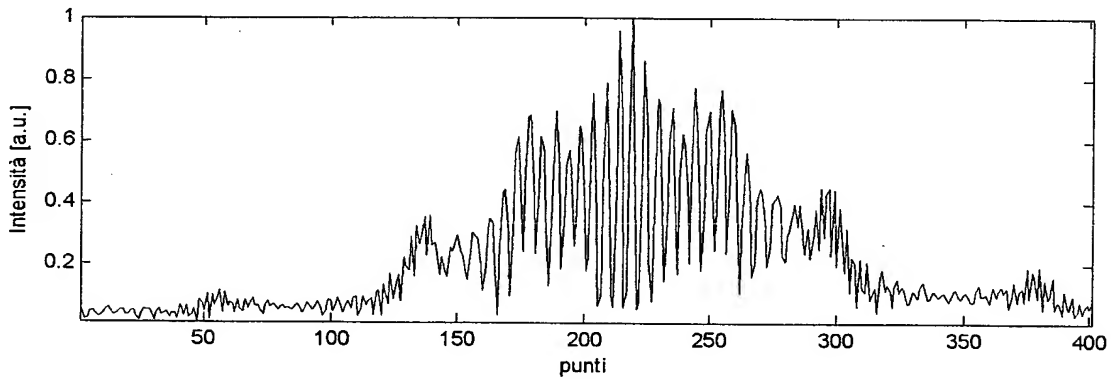


4/5
FIGURA 5/4

RM 2003 A 000 398



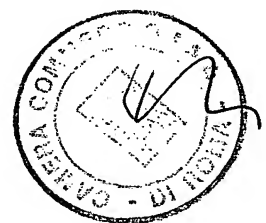
(a)



(b)

p.p.: Consiglio Nazionale delle Ricerche
Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

UN MANDATARIO
per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
(N° d'iscr. 4361)



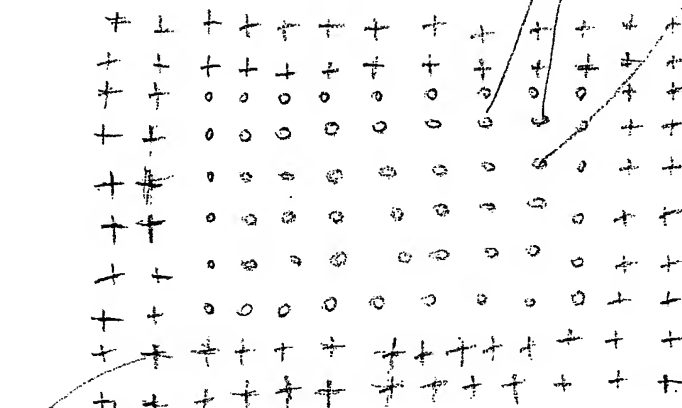
Figura

5

S/S

RM 2003 A 000 398

51



p.p.: Consiglio Nazionale delle Ricerche
Ing. Barzanò & Zanardo Roma S.p.A.

UN MANDATARIO
per se e per gli altri
Carlo Luigi Iannone
(N° d'iscr. 456)



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☒ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.